
Leiterplattendesign Für Schnelle Signale

Andy Kiser

Fachstelle Elektronik
Hochschule Technik+Architektur Luzern
Technikumstrasse 21
6048 Horw



Fachstelle Elektronik
Hochschule Technik+Architektur Luzern

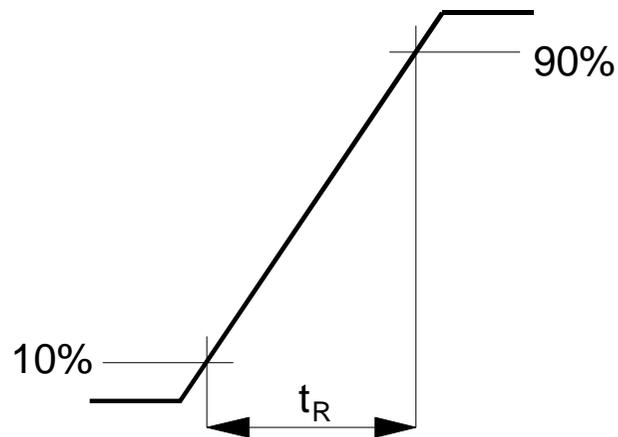
1

HighSpeed PCB.PPT / AK / 23.03.99

Aspekte

- Spektrum digitaler Signale
- Einzelnes Signal
 - *Laufzeit*
 - *Reflexion*
 - *Leitungsimpedanz*
 - *Leitungsabschluss*
- Mehrere Signale
 - *Abgestimmte Laufzeiten*
 - *Ü bersprechen*
 - *Bedeutung von Powerplanes*
- Umsetzung in PCB Designtools
 - *Designregeln*
 - *Konstruktion impedanzkontrollierter Leiterbahnen*

Spektrum digitaler Signale

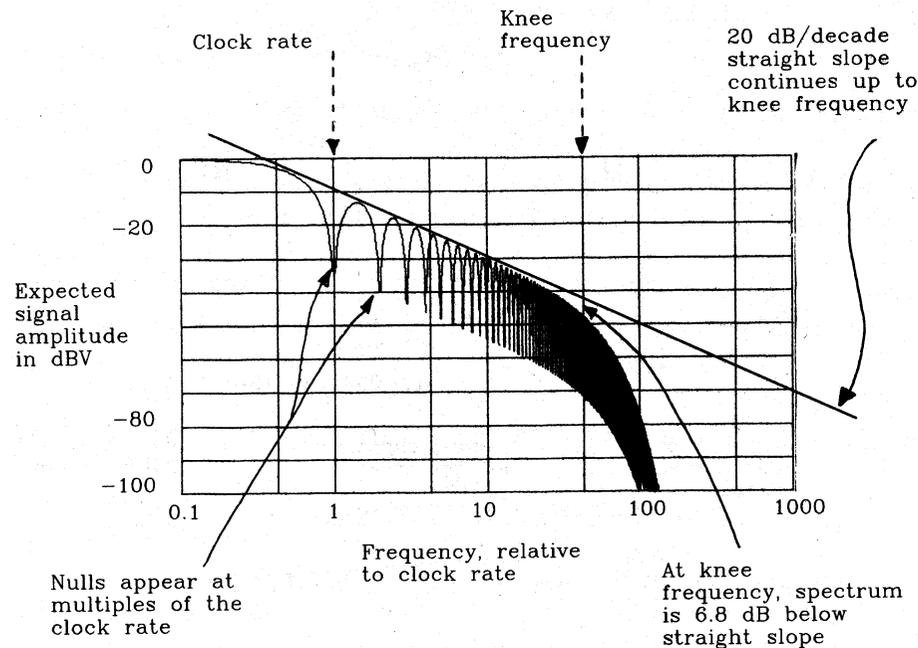


- Kritisch sind Signalflanken
- Eigentliche Signalfrequenz ist unwichtig
- Faustformel

$$f_{\max} \approx \frac{1}{2 \cdot t_r}$$

- *Beispiel: Logikfamilie 74hcxxx*
- $t_r = 7\text{ns} \quad \Rightarrow f_{\max} = 71\text{ MHz}$

Bedeutung des Frequenzpektrums



Spektrum eines digitalen Zufalls-Signals,
 $f_{\text{clk}}=1\text{Hz}$, $t_r=0.01\text{s}$

$$f_{\text{max}} \approx \frac{1}{2 \cdot t_r}$$

- Unverzerrte Signalübertragung
 - Eine Leitung mit flacher \hat{U} bertragungscharakteristik bis zur Frequenz f_{max} leitet ein digitales Signal praktisch unverzerrt.
- Grenze der Verarbeitung
 - Das Verhalten einer Schaltung oberhalb der Frequenz f_{max} muss nicht berücksichtigt werden.

Einzelne schnelle Signale

Signallaufzeit

- Konstanten

- *Elektrische Feldkonstante*

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

- *Magnetische Feldkonstante*

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$$

- Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum

- *Lichtgeschwindigkeit*

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 30 \frac{\text{cm}}{\text{ns}}$$

- Ausbreitung in beliebigem Medium

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Signallaufzeit auf Leiterplatten (1)

- Materialeigenschaften
 - *Magnetisch: für Leiterplatten werden keine ferromagnetischen Materialien verwendet.*

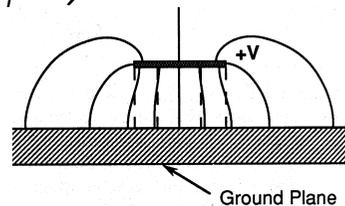
$$\mu_r = 1$$

- *Elektrisch: als Dielektrikum (Isolation) werden in der Regel Kunstharze oder andere Kunststoffe verwendet*

$$\epsilon_r \approx 4.5$$

- *Auf den Aussenlagen einer Leiterplatte verläuft ein teil der elektrischen Feldlinien durch die Luft ($\epsilon_r=1$). Effektiv wirkt dadurch*

$$\epsilon_{r(\text{aussen})} \approx 3.3$$



Signallaufzeit auf Leiterplatten (2)

- Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leiterplatten

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (c_0 : \text{Lichtgeschwindigkeit})$$

- *Auf Innenlagen*

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{4.5}} = 14 \text{ cm/ns}$$

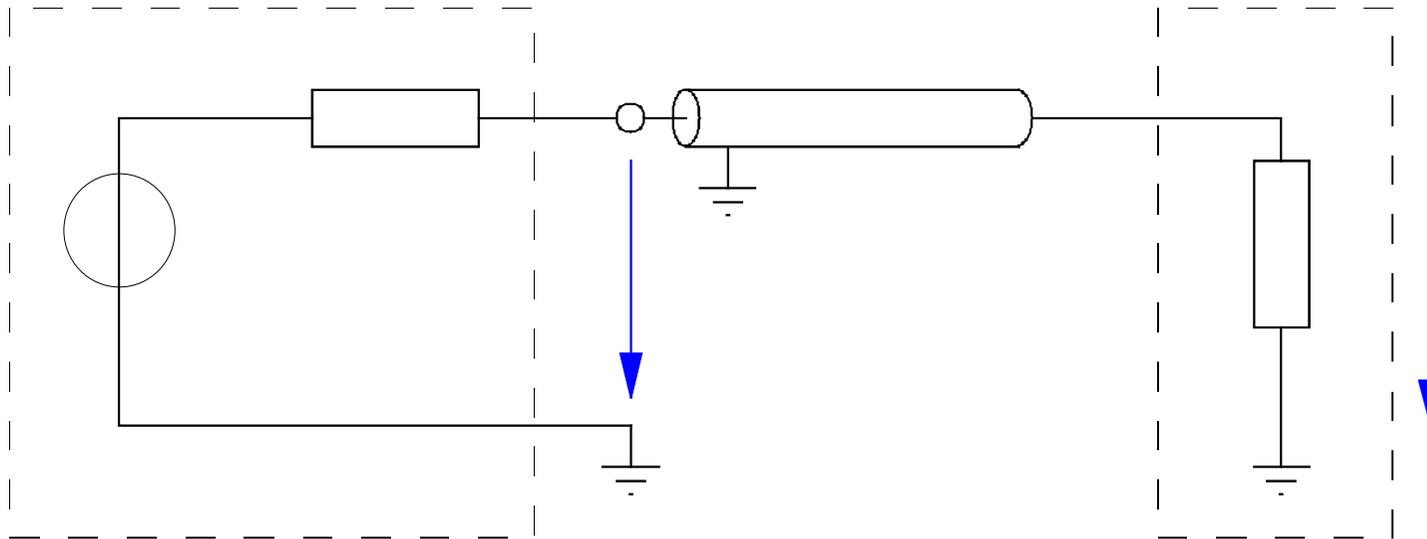
- *Auf Aussenlagen*

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{3.3}} = 16.5 \text{ cm/ns}$$

$$c \approx 15 \text{ cm/ns}$$

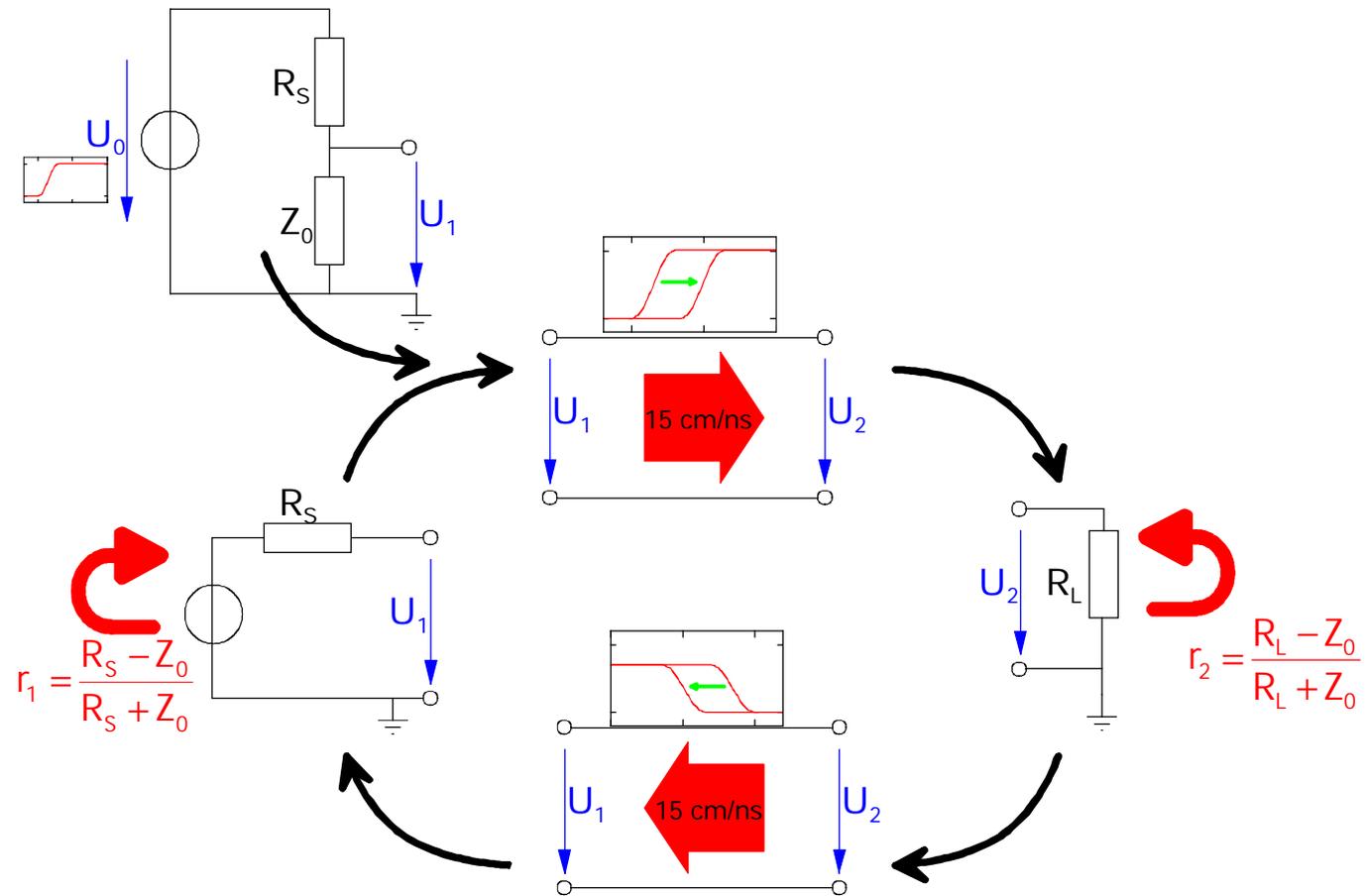
- Signale werden auf Aussenlagen schneller übertragen als auf Innenlagen

Reflexion: grundlegendes Modell

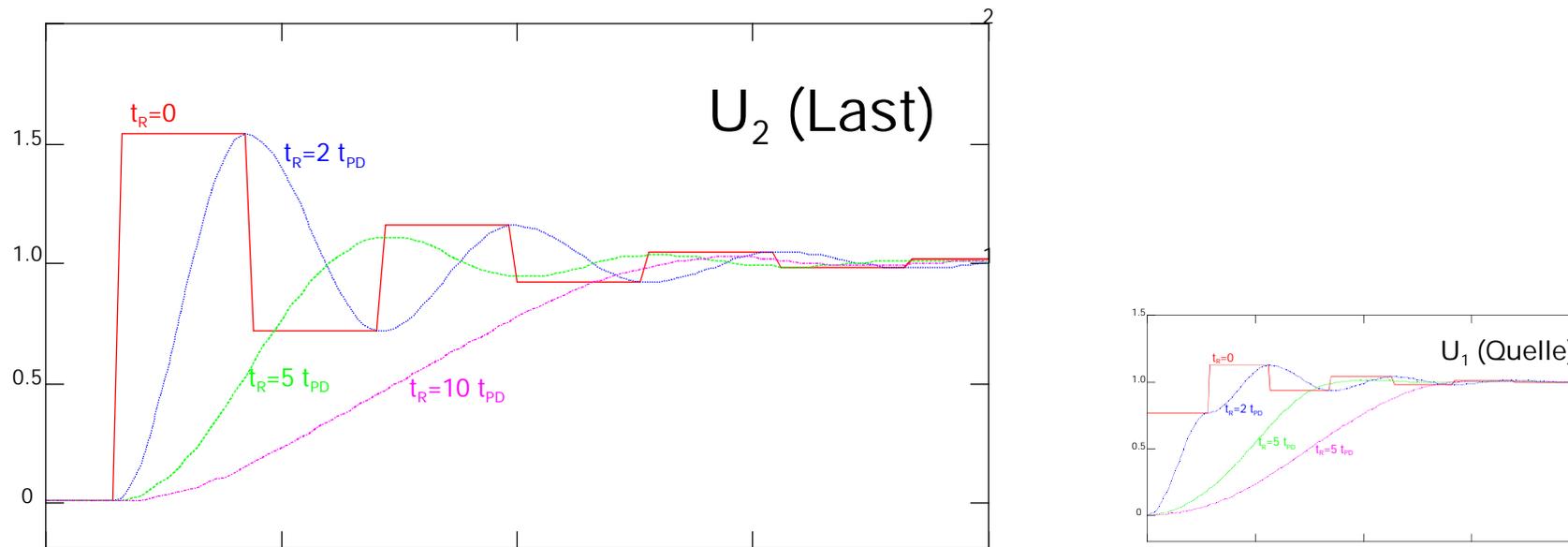


$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Zeitlicher Ablauf der Reflexionen

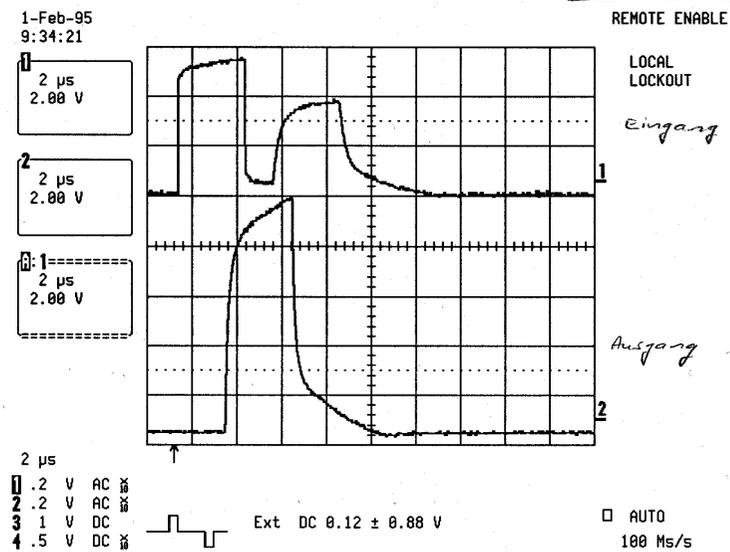


Mögliche Signalform bei Reflexionen

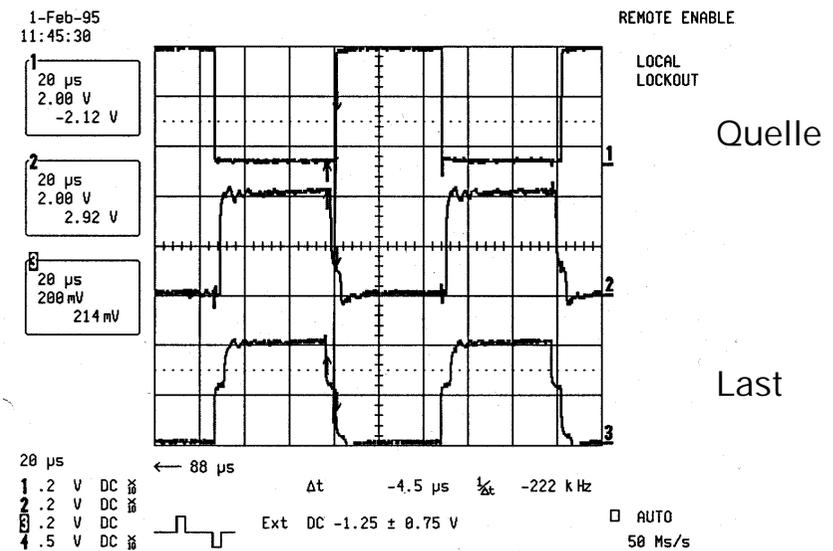


- Reflexionen führen zu Über- oder Unterschwingen des Signals
- Reflexionen sind vernachlässigbar, wenn die Anstiegszeit des Signals grösser ist als die 5-fache Verzögerung der Leiterbahn.

Reflexion in der Praxis



Reflektierter Puls mit korrektem Abschluss quellenseitig



Anstieg des Ausgangssignals in zwei Stufen

Kritische Leitungslänge

- Bei kurzen Leitungen geht der Anteil der reflektierten wellen in der ansteigenden Flanke unter

$$l_{\text{krit}} = \frac{t_r}{5} \cdot c = \frac{t_r}{5} \cdot 15 \frac{\text{cm}}{\text{ns}} = t_r \cdot 3 \frac{\text{cm}}{\text{ns}}$$

Bei Leiterbahnen, die länger sind als $t_r \cdot 3 \text{cm/ns}$, muss mit Reflexionen gerechnet werden.

- *Beispiel: Logikfamilie 74hcxxx*
- $t_r = 7 \text{ns} \implies l_{\text{krit}} = 21 \text{cm}$

Reflexionsgrad

- An der Last

$$r_2 = \frac{U_{2r}}{U_{2h}} = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$$

- An der Quelle

$$r_1 = \frac{U_{1r}}{U_{1h}} = \frac{R_S - Z_0}{R_S + Z_0}$$

- Keine Last ($R_L = \infty$)

- $R_2 = 1$
- *rücklaufende Welle ist gleich gross wie hinlaufende Welle*

- Kurzschluss ($R_L = 0$)

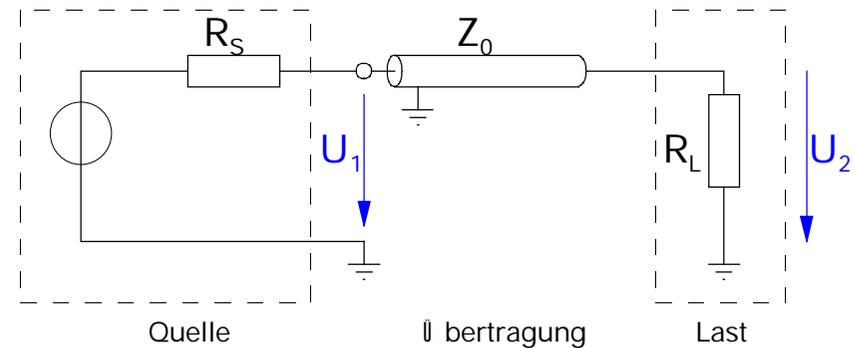
- $R_2 = -1$
- *rücklaufende Welle ist negativ zur hinlaufenden Welle*

- Korrekter Abschluss ($R_L = Z_0$)

- $R_2 = 0$
- *Es gibt keine rücklaufende Welle*

Verhindern von Reflexionen

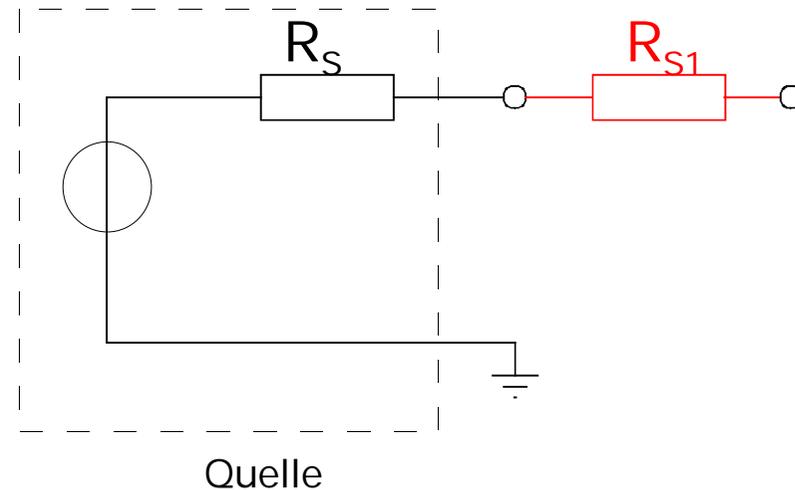
- Abstimmen der Impedanzen
 - *Quelle*
 - *Last*
 - *Übertragungsleitung*
- Übliche Impedanzniveaus
 - *50Ω* weit verbreitet
 - *75Ω* Radio/Fernsehen
 - *20Ω* sehr schnelle Digitalsysteme (z.B. RAMBUS)
- Digitale Quellen und Lasten
 - *Quellenwiderstände im Bereich 10Ω*
 - *Eingänge sehr hochohmig*



Abschluss (1)

Quelle

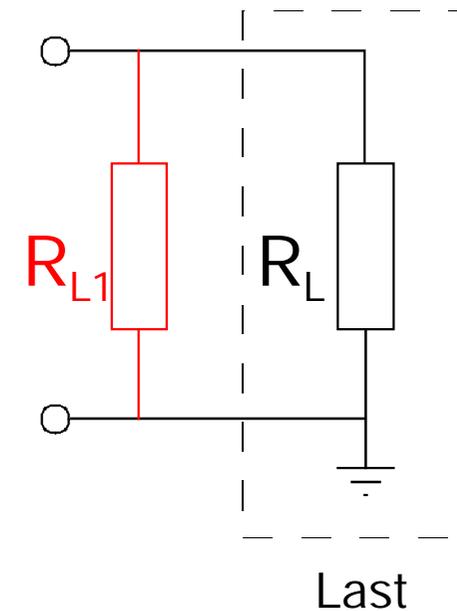
- Quelle ist üblicherweise zu niederohmig
- Abschluss durch Hinzufügen eines Seriewiderstandes
- Keine elektrischen Nachteile
- $Z_0 = R_s + R_{s1}$



Abschluss (2)

Last

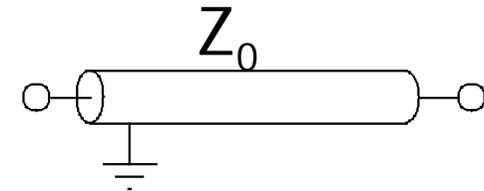
- Last ist üblicherweise zu hochohmig
- Abschluss durch hinzufügen eines Parallelwiderstandes nach Masse oder VCC
- Nachteil: dauernder Stromfluss durch den Abschlusswiderstand
- Es existieren Schaltungen, die diesen Nachteil teilweise aufheben
- $Z_0 = R_L \parallel R_{L1}$



Abschluss (3)

Leitungsimpedanz

- Die Leitungsimpedanz wird nur durch die Geometrie der Leitung und das umgebende Dielektrikum bestimmt
- Folgende Parameter beeinflussen die Impedanz:
 - *Breite und Höhe der Signalleiterbahn*
 - *Abstand des Leiters zu den nächstgelegenen Power- oder Groundplanes*
 - ϵ_r des Materials, das den Leiter umgibt.



Abschlüsse in der Praxis

- Oft wird nur die Quelle abgeschlossen
 - *Das Signal wird an der Last reflektiert*
 - *Die rücklaufende Welle wird an der Quelle ausgelöscht*

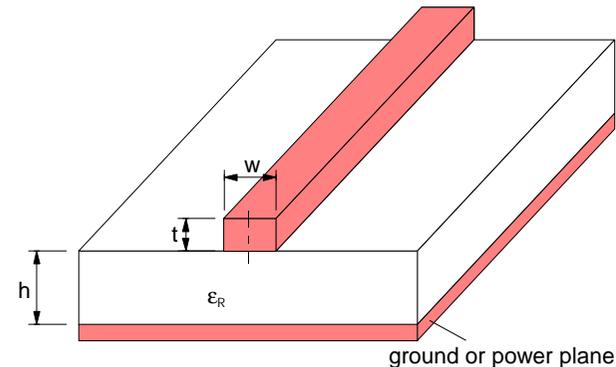
 - *Funktioniert gut bei Punkt-zu-Punkt Verbindungen*
 - *Schaltungen, die das Signal vor dem Leitungsende abgreifen, sehen die Signalflanke aufgeteilt in zwei Schritte*

Microstrip

- Signalleitung über einer Ground- oder Powerplane
- Für $0.1 < w/h < 2.0$, $1 < \epsilon_r < 15$ und oberhalb der Leiterbahn Luft

$$Z_0 \approx \frac{87\Omega}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \cdot \ln \frac{5.98 h}{0.8 w + t}$$

- Beispiel:
 - $h=0.4\text{mm}$, $w=0.7\text{mm}$, $t=0.035\text{mm}$,
 $\epsilon_r=4.5$
 - $Z_0 = 50\Omega$

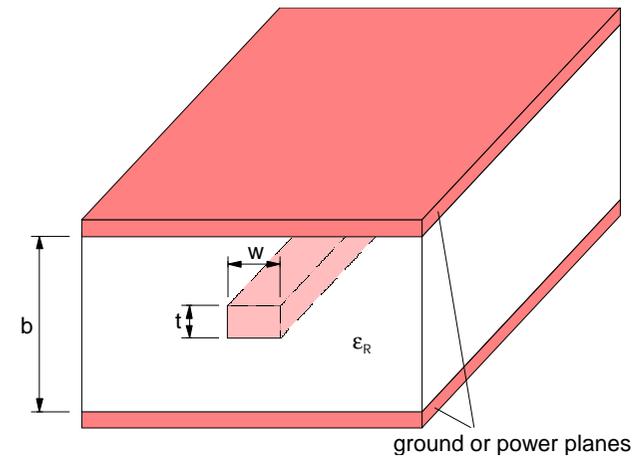


Stripline

- Signalleitung zwischen zwei Ground- oder Powerplanes
- Für $w/b < 0.35$ und $t/b < 0.25$

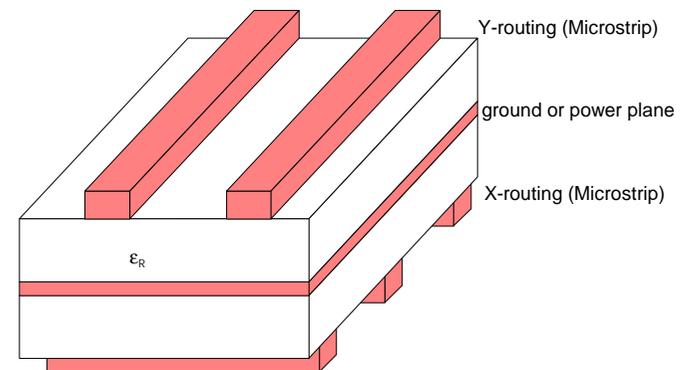
$$Z_0 \approx \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{1.9 b}{0.8 w + t}$$

- Beispiel:
 - $b=0.8\text{mm}$, $w=0.28\text{mm}$, $t=0.035\text{mm}$,
 $\epsilon_r=4.5$
 - $Z_0 = 50\Omega$



Lagenaufbau mit Microstrip

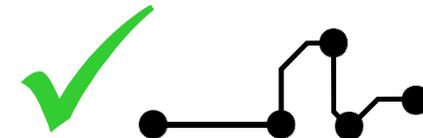
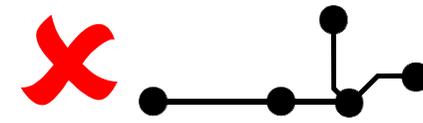
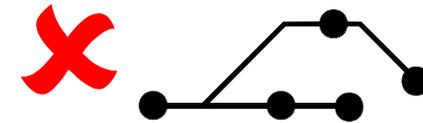
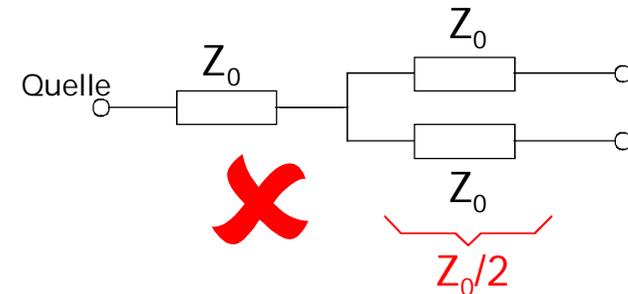
- x- und y-Verbindungen in der Nähe derselben Plane führen
- Falls dies nicht möglich ist, müssen in der Nähe von Vias Bypass-Kondensatoren zwischen den Planes gesetzt werden



Routen von schnellen Netzen

- Verzweigungen in impedanzkontrollierten Leitungen
 - *Abzweigungen führen durch die andere Gesamtimpedanz zu Reflexionen*
- Kurze Abzweigungen (Stubs)
 - *Erzeugen auch Reflexionen.*
 - *Durch die kurzen Laufzeiten können sich die Auswirkungen mit der Signalflanke vermischen*
 - *Bauteilanschlüsse sind ebenfalls Stubs*
 - *Einzelne Stubs bis 10mm Länge können meist toleriert werden*

Schnelle Signale sollten ohne Abzweigungen geroutet werden



Verknüpfte schnelle Signale

Abgestimmte Laufzeiten

- Allgemein
 - *Setup- und Holdzeiten sind in schnellen Systemen knapp bemessen*
 - *Routing-Verzögerungen wirken genauso wie die Laufzeiten der Logikgatter*

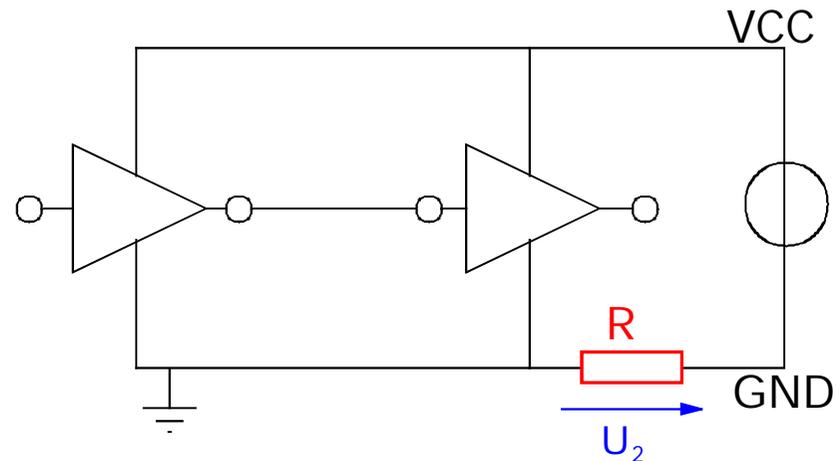
- Clock-Leitungen
 - *Clocksignale müssen so verteilt werden, dass sie an verschiedenen Punkten zur selben Zeit eintreffen*
 - Jeder Signalpfad muss gleich viele (und identische) Gatter beinhalten
 - Die Signalverzögerung jedes Pfades muss gleich sein

 - *Jede Differenz in der Signallaufzeit verringert im gleichen Mass den zulässigen Clock-Jitter*

Übersprechen

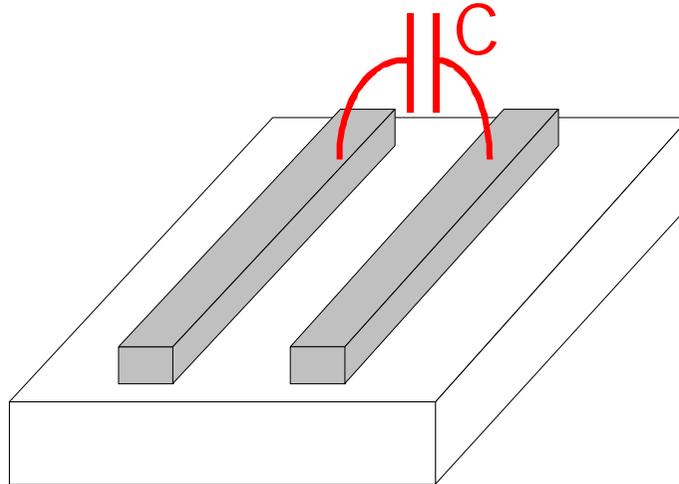
- Übersprechen entsteht durch Kopplung von zwei Signalleitungen
- Es werden drei Kopplungsarten unterschieden
 - 1) *galvanische Kopplung (durch ohmschen Widerstand)*
 - 2) *kapazitive Kopplung*
 - 3) *induktive Kopplung*
- Galvanische und kapazitive Kopplung werden meist beachtet
- Induktive Kopplung wird oft vernachlässigt
- Bei schnellen digitalen Signalen stellt die induktive Kopplung das grösste Problem dar.

1) Galvanische Kopplung



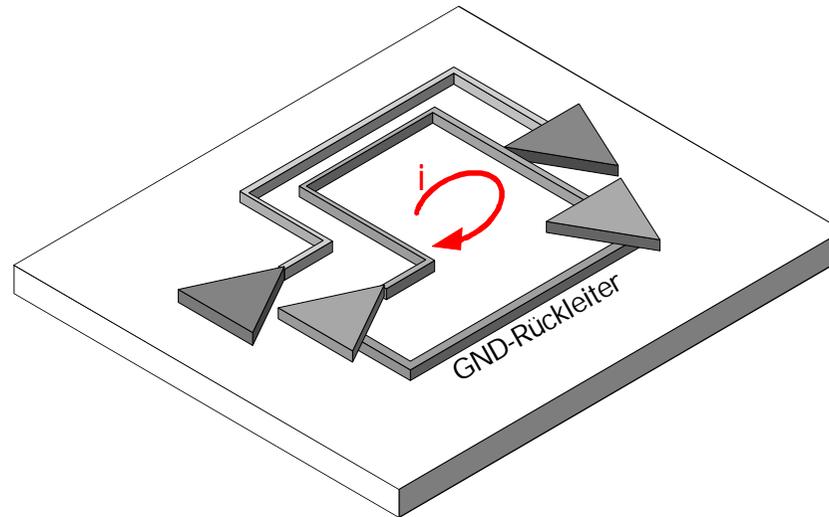
- Galvanische Kopplung entsteht durch Strom in einem gemeinsamen Leiter
- Kann vermindert werden durch Aufteilen der gemeinsamen Leitung

2) Kapazitive Kopplung



- Kapazitive Kopplung entsteht dadurch, dass zwei parallele Leiter immer auch einen Plattenkondensator darstellen
- Kann vermindert werden durch grösseren Leiterabstand, und nur kurze parallele Leiterführung

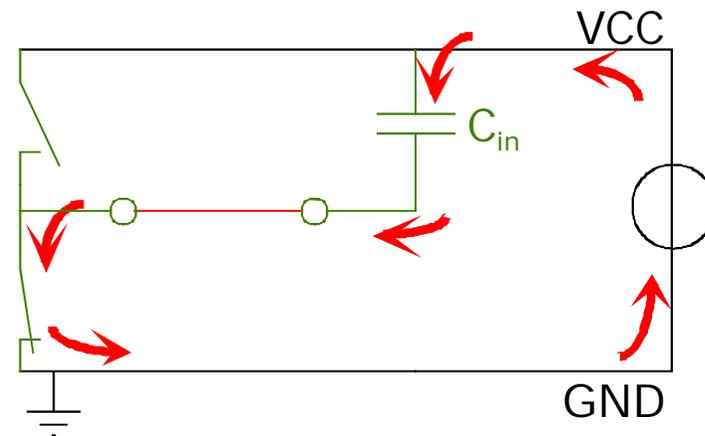
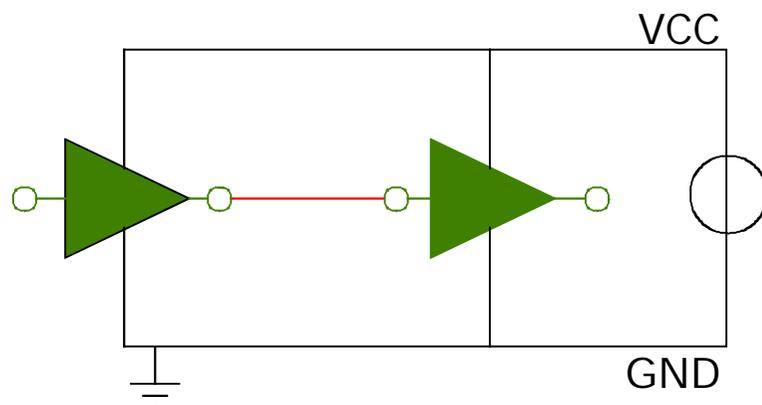
3) Induktive Kopplung



- Induktive Kopplung entsteht durch überlappende Stromschleifen
- Stromschleifen müssen möglichst klein gehalten werden
 - *Im Gegensatz zur Regel „Signalleitungen müssen kurz sein“*

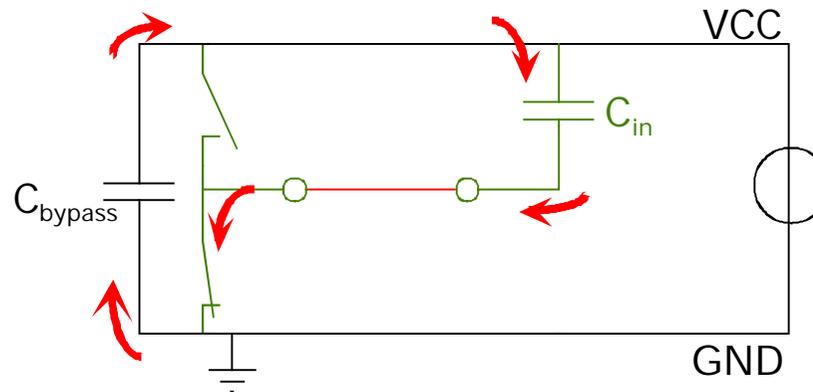
Strompfad

Strom fließt nur in einem geschlossenen Stromkreis
Dies gilt auch für digitale Signale !



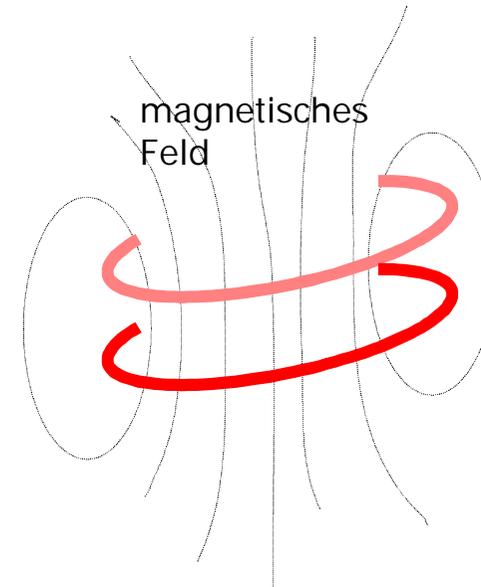
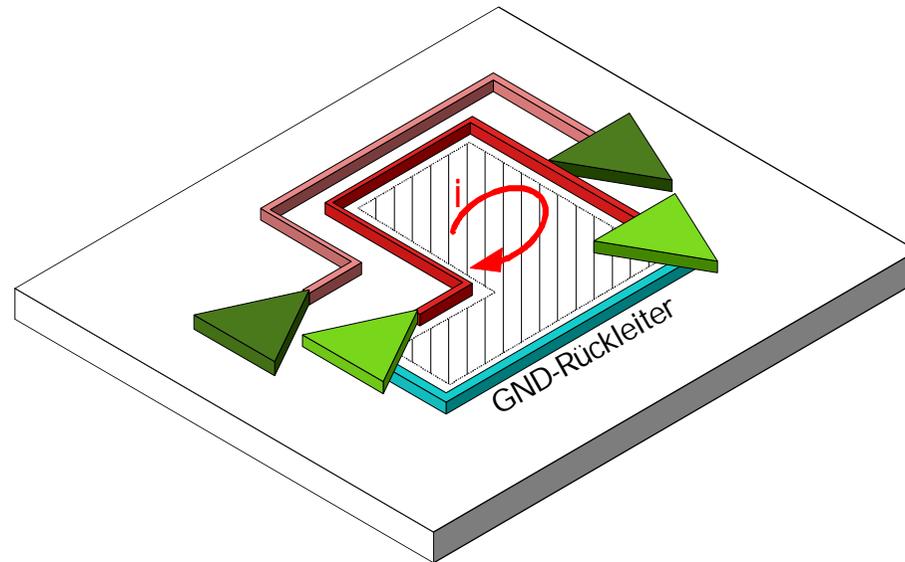
- Übliche Regel: Signalpfad möglichst kurz halten
- Für schnelle Signale reicht dies nicht

Bypass-Kondensator



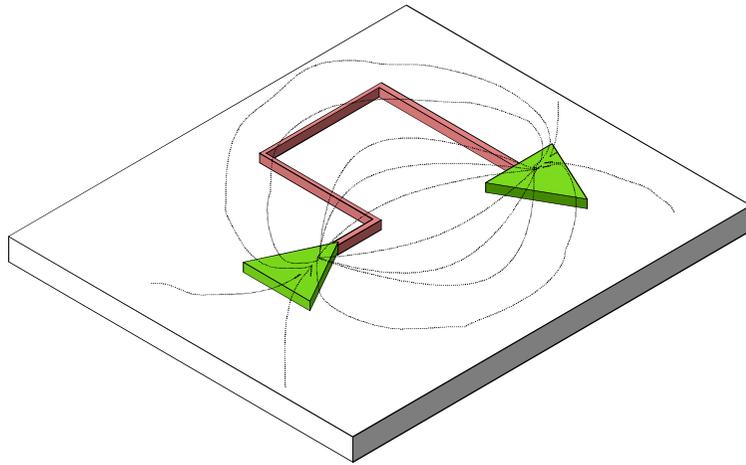
- Speisestrom für die schnelle Flanke wird aus dem Bypass-Kondensator bezogen, nicht aus der Spannungsquelle
- Bypass-Kondensator verkleinert die Stromschleife

Strompfad ohne Groundplane

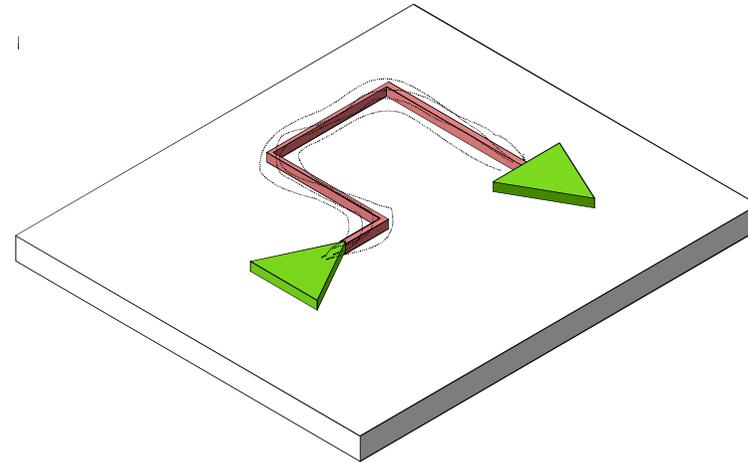


- Die beiden Stromschleifen sind magnetisch stark gekoppelt
- Dadurch entsteht starkes induktives \ddot{U} bersprechen, wie bei einem Transformator
- Bessere Lösung: GND-Leiter entlang der Signalleitung zurückführen

Strompfad mit Groundplane

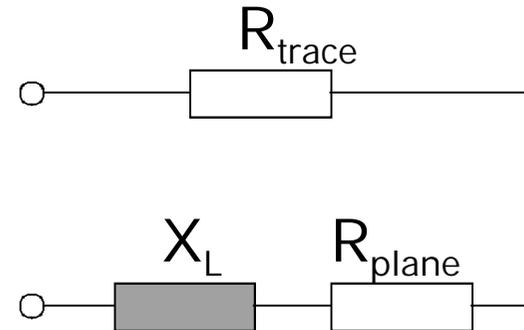
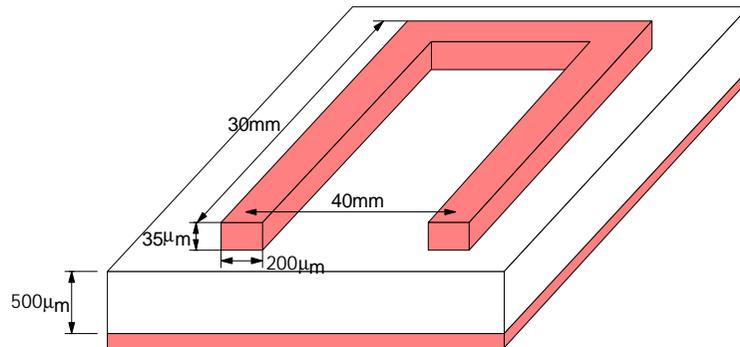


- DC-Rückstrom folgt dem Weg des geringsten ohmschen Widerstandes



- Hochfrequenter Rückstrom folgt dem Weg der geringsten Induktivität

Strompfad mit Groundplane: Beispiel



Der Rückstrom folgt dem Pfad der kleinsten Induktivität

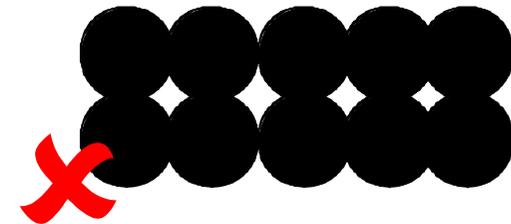
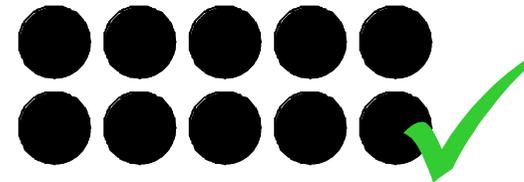
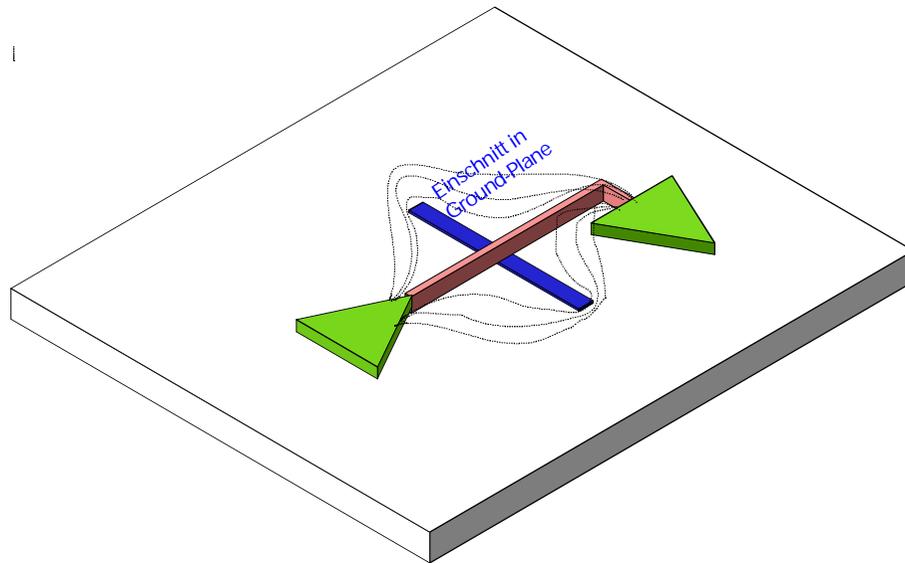
- Rückstrom auf direktem Weg

- R_{trace} = 250 m Ω
- R_{plane} = 0.9 m Ω
- L = 180 nH
- $\approx 1100 \text{ m}\Omega @ 1\text{MHz}$

- Rückstrom unter dem Leiter auf 1mm Breite

- R_{trace} = 250 m Ω
- R_{plane} = 50 m Ω
- L = 60 nH
- $\approx 400 \text{ m}\Omega @ 1\text{MHz}$

Schlitz in der Groundplane



- Schlitz zwingt den Rückstrom, eine grössere Schleife zu bilden
- Das induktive \ddot{U} bersprechen wird dadurch stark erhöht
- Schlitz können durch zu grosse Pins / Vias gebildet werden

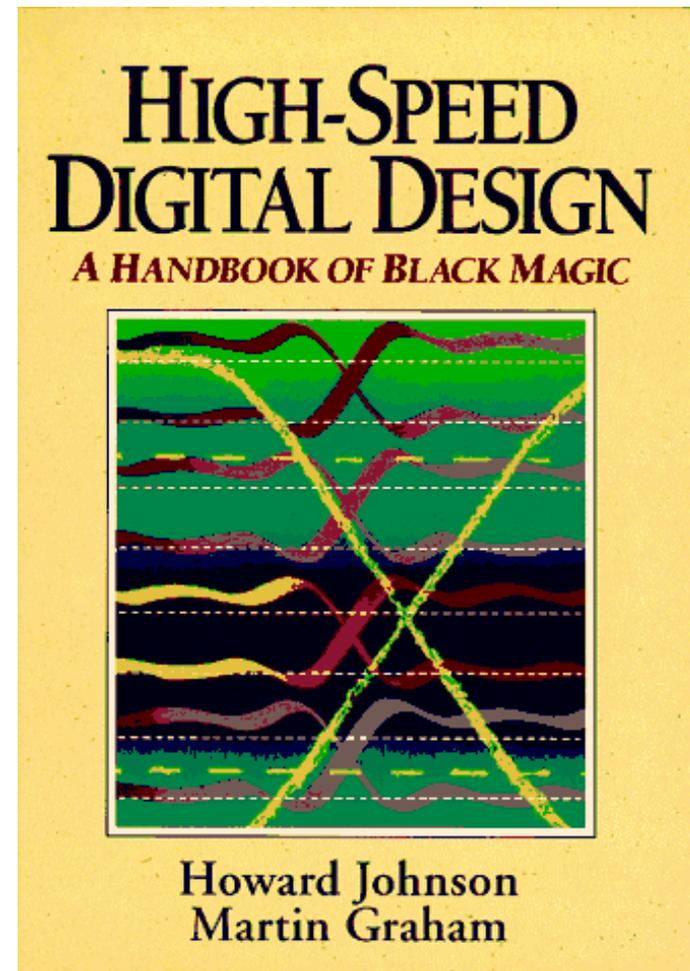
Bedeutung der Groundplane

- Erst eine Plane ermöglicht Leiterbahnen mit kontrollierter Impedanz
- Galvanische Kopplung über die Speisung wird stark reduziert
 - (*Geringer ohmscher Widerstand*)
- Kapazitive Kopplung wird reduziert
- Induktive Kopplung wird sehr stark reduziert
 - (*Kleinere Stromschleifen*)

Eine Groundplane bringt eine Verbesserung der Signalqualität um Faktoren

Literatur

- Prentice Hall
- ISBN: 0-133 957 24-1
- Mehr Infos
 - <http://www.sigcon.com/books.htm>





***Weiterbildungsinitiative
Elektronik***